

ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ДВУХФАЗНЫХ КОНТАКТНЫХ ПЛЕНКАХ

Одна из наиболее распространенных причин отказов существующих образцов ракетно-артиллерийского вооружения (РАВ) обусловлена деградиационными процессами, происходящими в элементной базе электрооборудования систем управления. К числу весьма уязвимых элементов автоматики относятся электрические реле [1]. Современные системы управления РАВ характеризуются все возрастающей энергонагруженностью. Зачастую электрические реле работают в условиях управления высокочастотным, сильноточным сигналом. В процессе эксплуатации на контактных поверхностях реле реализуется сложный комплекс физико-химических процессов. Происходят процессы окисления, адсорбции и конденсации различных паров, распыления и повторного осаждения материала контактной пары, формирования пленок потускнения, электролиза и электрохимического осаждения и т.д. Необходимо также учитывать наличие частиц пыли и иных загрязнений. В итоге на контактных поверхностях формируется многофазная, пространственно неоднородная среда, через которую и осуществляется распространение электрического тока [1,2]. Схема сечения подобной системы представлена на рис. 1а.

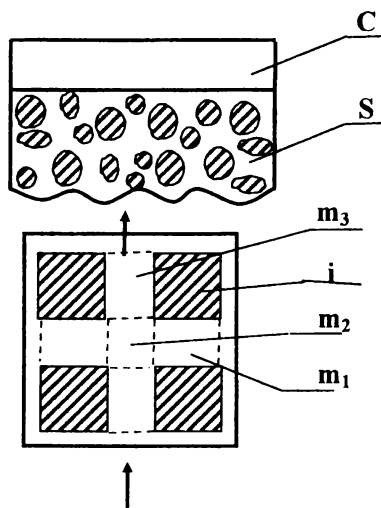


Рис.1. Схемы двухфазных контактных пленок

а □ сечение участка контактной поверхности; С – исходный материал контакта; S – многофазный слой, сформировавшийся в результате процессов деградации; включения заштрихованы; стрелка – направление распространения тока;

б □ схема идеализированной двухфазной проводящей системы. Пунктирными линиями выделены области, ответственные за формирование пиков m_k и i на спектрах напряженности поля рис.2.

К числу наименее исследованных закономерностей процессов переноса в подобных пространственно неоднородных системах относится явление концентрации движущих термодинамических сил (напряженности электрического поля, градиента температуры и других сил) в окрестностях геометрических особенностей неоднородной среды. Ранее в работах [3,4] исследовались особенности распределения мощности джоулева тепла в двухфазных резистивных материалах. Показано наличие аномально больших перегревов проводящей среды, локализованных вблизи границ слабопроводящих включений. Можно ожидать также наличия подобных же эффектов и для пространственных распределений напряженности электрического поля. Интерес к данному явлению обусловлен, в частности и тем, что высокие значения напряженности в контактных материалах являются инициатором ряда деградационных процессов, в частности фриттинга [2].

Задача настоящей работы состоит в исследовании закономерностей формирования спектров значений напряженности электрического поля, осуществляющееся в модельной двухфазной системе, характеризуемой матричной структурой, подобной представленной на рис.1а. Исследуем закономерности течения электрического тока через нее и характер пространственного распределения напряженности электрического поля в ней.

Осуществим идеализацию системы, используя алгоритм, развитый в ряде работ Г.Н.Дульнева (см. например [5]). Положим, что включения имеют одинаковую, квадратную в сечении, форму и расположены регулярно. Схема сечения обсуждаемой идеализированной системы изображена на рис.1б.

Будем учитывать, что удельные проводимости матрицы и включения могут существенно, в 10-100 раз отличаться друг от друга.

Для создания модели электрических явлений, происходящих в обсуждаемой системе, используем метод конечных элементов. Ранее он применялся в ряде работ [6-10] с целью оптимизации эксплуатационных свойств двухфазных резистивных материалов.

В основу использования метода конечных элементов положен вариационный принцип, согласно которому пространственное распределение электрического потенциала φ устанавливается из условия минимума функционала, [11]

$$\chi = \int_{S_c} \sigma (\text{grad} \varphi)^2 dV, \quad (1)$$

где σ - удельная локальная проводимость материала, S_c – сечение рабочего объема, характеризуемого двумерной плоской симметрией, dV – элемент его объема. Для нахождения функции φ , минимизирующей величину χ , осуществим дискретизацию двумерного пространства S_c треугольными симплекс-элементами [11]. Алгоритм поиска функции φ был неоднократно описан ранее, в частности, в цитирувавшихся выше работах [4,6-10].

Используя установленные значения пространственного распределения электрического потенциала, нетрудно теперь получить значения градиента потенциала, то есть напряженности электрического поля $E = |\text{grad} \varphi|$. Далее используем методику, подобную предложенной в работе [4] для анализа локальных особенностей пространственных распределений мощности тепловыделения. С этой целью реализуем следующую процедуру.

Перейдем к безразмерным переменным $e = E / E_0$, где E_0 – напряженность, которая реализовалась бы в однородной матрице.

Введем в рассмотрение спектральную функцию локальной напряженности электрического поля $\gamma(e)$, устанавливающую вероятность W обнаружения в двумерном образце заданного абсолютного значения напряженности

$$dW = \gamma dS, \quad (2)$$

dS – элемент площади сечения образца. В обсуждаемых условиях вероятность dW пропорциональна доле площади сечения рассматриваемого рабочего объема S_c , в которой реализуется значение градиента, попадающее в интервал $e \pm de/2$. Таким образом, спектральную функцию можно определить следующим образом

$$\gamma(e) = (dS/de) / S_c, \quad (3)$$

где dS – элемент поверхности, $1/S_c$ – нормирующий множитель. Дальнейший алгоритм нахождения спектральной функции напряженности подобен использованному в работе [4], для установления спектральной функции плотности тепловыделений.

Проведенные нами расчеты показали, что в рассматриваемых условиях напряженность электрического поля весьма неоднородна. На рис.2 представлены характерные спектры напряженности, рассчитанные в настоящей работе для системы с прямоугольными включениями при варьируемых значениях концен-

трации включений. Здесь рассматривается ситуация, когда проводимость включения в десять раз меньше проводимости матрицы.

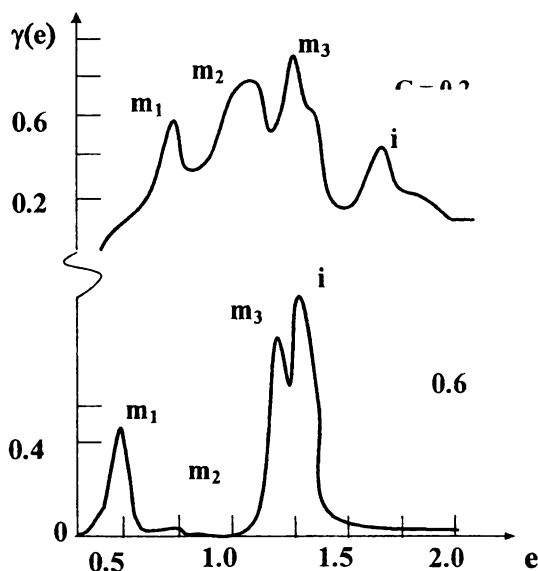


Рис.2.

Влияние концентрации квадратных включений на формы спектров значений относительной напряженности электрического поля, рассчитанные для соотношения проводимостей включений и матрицы равных 0,1; цифры около кривых – значения концентрации включений; амплитуды распределений отнормированы в максимуме на единицу

Значение величины γ на спектрах пропорционально объему двухфазной пленки, в пределах которого реализуется величина напряженности e . Наличие достаточно ярко выраженных пиков на кривых свидетельствует о существовании четырех протяженных областей с примерно постоянным характерным значением e_j . Анализ расчетных данных привел нас к выводам, что существует взаимное соответствие между пикам m_i и i на спектрах и областями двухфазной системы, отмеченными на рис.1б соответствующими символами. Таким образом, в рассматриваемых условиях максимальные значения напряженности присущи слабо проводящим включениям. Область m_1 оказывается своеобразным образом «экранирована» слабо проводящим включением и напряженность поля в ней заметно ниже средней, характеризуемой значением $e = 1$.

Обращает внимание значительная размытость спектров. Следует заметить, что в идеальном случае однородной среды и проводящей области, имею-

щей сечение прямоугольной формы, должно реализоваться некоторое постоянное значение напряженности $e_0 = 1$. В подобной ситуации спектр вырождается в дельта-образную функцию.

Следует отметить также, что проведенные нами расчеты позволяют сделать вывод о высокой чувствительности формы спектров и положения пиков на них от соотношения следующих параметров: концентрации включений, отношения проводимостей матрицы и включения и формы последних. Можно ожидать, что в некоторых условиях величины напряженности, реализующиеся в двухфазных системах, могут существенно превысить значение относительной напряженности $e = 1$, устанавливаемое для однородной системы. Однако результаты систематизации подобных закономерностей выходят за рамки настоящего краткого сообщения. Результаты их исследований предполагается рассмотреть в наших дальнейших публикациях.

Подводя итог, отметим, что в настоящей работе обнаружено явление формирования тонкой структуры в спектрах напряженности электрического поля контактных двухфазных пленок. Анализ спектров свидетельствует о достаточно неравномерном распределении электрического поля в пределах двухфазной пленки. Развита методика позволяет прогнозировать возникновение концентраций напряженности в некоторых особых точках пространственно неоднородной среды.

Библиографический список

1. Смирнов В.И., Матта Ф.Ю. Теория конструкций контактов в электронной аппаратуре. - М.: Сов. радио, 1974 - 174 с.
2. Хольм Р. Электрические контакты. - М.: ИЛ, 1961 - 464 с.
3. Икрянников В.И. Возникновение тепловой структуры в неоднородном проводнике при протекании электрического тока высокой плотности// Инж. физ. журн. – 1992. - Т.62. - №4. - С.617-623.
4. Метод конечных элементов: проводимость и выделение джоулева тепла в регулярных структурах /И.Н.Сачков, А.Г.Гофман, Ф.А.Сидоренко, П.В.Гельд // Изв. вузов. Физика. - 1996. - Вып. 5. - С. 17-23.
5. Дульнев Г.Н., Новиков В.В. Процессы переноса в неоднородных средах. - Л.: Энергоатомиздат, 1991 - 258 с.
6. Андреева А.Г., Сачков И.Н., Повзнер А.А. Условия формирования нулевого температурного коэффициента сопротивления в матричных системах металл-полупроводник // Инж. физич. журн. –2001. - Т.74. - №1. - С.153-155.
7. Повзнер А.А., Андреева А.Г., Сачков И.Н., Крюк В.В. Формирование резистивных свойств двухфазных систем полупроводник-металл на основе Fe

Si1+x при малых отклонениях от стехиометрии // Журн. техн. физики. – 2001. - Т.71. - Вып.8. - С.109-111.

8. Мелких А.В., Повзнер А.А., Андреева А.Г., Сачков И.Н. Неравновесные фазовые переходы и s-образные вольт-амперные характеристики в системе полупроводник-металл // Письма в журн. техн. физики. – 2001. - Т.27. - Вып.6. - С.19-25.

9. Крюк В.В., Пилюгин А.В., Повзнер А.А., Сачков И.Н. Особенности формирования резистивных состояний с аномально малыми температурными коэффициентами электросопротивления в гетерогенных системах Fe Si – Fe Si₂ // Инж. физич. журн. – 2002. - Т.75. - №3. - С. 171-175.

10. Сачков И.Н., Повзнер А.А. Электронный переход полупроводник-металл и особенности проводимости гетерофазных систем Fe Si – Fe Si₂ // Физика тверд. тела. 1996. - Т. 38. - Вып. 10. - С. 2969-2972.

11. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. - М.: Мир, 1979. - 392 с.

Сачков И.Н., Каржавин В.В., Копылов С.Н.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ МИКРОКОНТАКТНЫХ ЯВЛЕНИЙ, ОСНОВАННОЙ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Одна из наиболее общих проблем, возникающих при конструировании электрических машин и оптимизации режимов их работы, обусловлена необходимостью моделировать процессы рассеяния тепла. Зачастую работоспособность изделий и их ресурс ограничиваются деградационными процессами, возникающих в различных контактных парах при протекании через них потоков электричества и тепла.

Известно, что любой разъемный макроскопический контакт осуществляется через совокупность пятен касания, которые, в свою очередь, реализуются через микроконтакты [1]. Эксплуатация электрических машин сопровождается распространением потоков тепла, электричества и массы, пересекающих поверхности электрических, механических и тепловых контактов. В области микроконтактов потоки тепла или электричества формируют области стягивания потоков, характеризующихся высокими температурами, искривлениями линий тока и большими значениями градиента термодинамического потенциала. При этом в микрообъемах контактов могут происходить процессы плавления, окисления, деформации, выкрашивания, а также переноса вещества с контакта на контакт путем механизмов диффузии, механического переноса и сплавления,